



(21) Aktenzeichen: P 42 24 190.1
(22) Anmeldetag: 22. 7. 92
(23) Offenlegungstag: 27. 1. 94

(71) Anmelder:
ABB Research Ltd., Zürich, CH

(74) Vertreter:
Rupprecht, K., Dipl.-Ing., Pat.-Anw., 61476 Kronberg

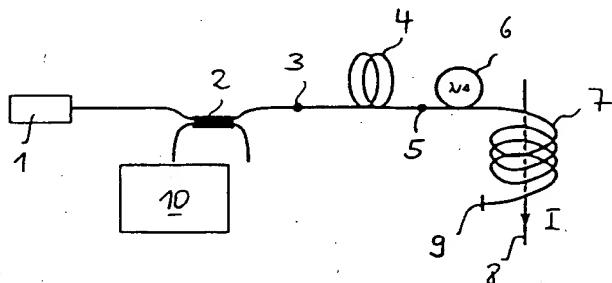
(72) Erfinder:
Frosio, Guido, Dr., La Chaux-de-Fonds, CH

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit
in Betracht zu ziehende Druckschriften:

DE	22 61 151 B2
DE	39 23 803 A1
DE	31 16 149 A1
DE	31 15 433 A1
FR	24 85 204
US	50 51 577
EP	4 30 060 A1
EP	3 56 670 A1
WO	91 01 501

(54) Faseroptischer Stromsensor

(57) Der auf dem Faraday-Effekt basierende faseroptische Stromsensor zur Messung des in einem elektrischen Stromleiter (8) fließenden Stromes (I) umfaßt eine linear polarisierende Lichtquelle (1) mit kurzer Kohärenzlänge, eine zwei optische Achsen aufweisende polarisationserhaltende Faser (4), einen Faserkoppler (2), einen Lambda/4-Retarder (6), eine in mehreren Windungen um den Stromleiter (8) geführte Sensorfaser (7) und eine Interferenz-Auswerteeinheit (10). Das Licht von der Lichtquelle (1) ist über den Faserkoppler (2) derart in die polarisationserhaltende Faser (4) eingekoppelt, daß in dieser zwei zueinander orthogonale Moden etwa gleich stark angeregt sind. Mittels des Lambda/4-Retarders (6) wird aus dem nach Durchlaufen der polarisationserhaltenden Faser (4) gegeneinander phasenverschobenen Moden einerseits rechts- und andererseits linkszirkular polarisiertes Licht erzeugt. Die Sensorfaser (7) ist an ihrem freien Ende verspiegelt. Durch die sich dadurch ergebende Reflexgeometrie läuft das Licht den gleichen Lichtweg wieder zurück, wobei der in der polarisationserhaltenden Faser zwischen den beiden Moden akkumulierte Gangunterschied wieder ausgeglichen wird. Der Lichtweg ist in dieser Hinsicht reziprok. Der zum Strom (I) im Stromleiter (8) proportionale, nicht-reziproke Faraday-Effekt wird durch Auswertung des von den beiden reflektierten Moden erzeugten Interferenzmusters mittels der Auswerteeinheit (10) ermittelt.



1

Beschreibung

Technisches Gebiet

Die vorliegende Erfindung betrifft einen, auf dem Faraday-Effekt basierenden faseroptischen Stromsensor zur Messung des in einem elektrischen Stromleiter fließenden Stromes, umfassend

- a) eine linear polarisiertes Licht erzeugende Lichtquelle;
- b) eine zwei optische Achsen aufweisende polarisationserhaltende Faser
- c) einen Faserkoppler
- d) einen Lambda/4-Retarder,
- e) eine in mehreren Windungen um den Stromleiter geführte Sensorfaser, und

eine Interferenz-Auswerteeinheit,
wobei das Licht von der Lichtquelle über den Faserkoppler derart in die polarisationserhaltende Faser eingekoppelt ist, daß in dieser beide Polarisationsrichtungen gleichstark angeregt sind, und
wobei der Lambda/4-Retarder im Lichtweg zwischen der polarisationserhaltenden Faser und der Sensorfaser angeordnet ist.

Stand der Technik

Ein faseroptischer Stromsensor dieser Art ist aus G. Frosio, K. Hug, R. Dändliker, All-Fiber Sagnac Current Sensor, Opto92, Paris 1992, bekannt. Wichtige Grundlagen bezüglich des verwendeten Meßprinzips sind in S. Ezekiel, H.J. Arditty, Fiber-Optic Rotation Sensors and Related Technologies, Proceedings of the First International Conference MIT, Cambridge, Mass. USA, November 9–11, 1981, Springer-Verlag Heidelberg, New York 1982, beschrieben.

Bei dem bekannten Stromsensor durchläuft das Licht eine geschlossene Faserschleife, welche neben der Sensorspule zwei polarisationserhaltenden Fasern und zwei Lambda/4-Retarder umfaßt. Zur Ankopplung an die geschlossene Faserschleife und zur Aufspaltung des Lichtweges ist ein zusätzlicher, polarisationserhaltender Faserkoppler vorgesehen.

Darstellung der Erfindung

Es ist Aufgabe der vorliegenden Erfindung, einen faseroptischen Stromsensor eingangs genannten Art anzugeben, welcher sich gegenüber dem bekannten u. a. durch einen einfacheren Aufbau auszeichnet. Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß gelöst durch einen faseroptischen Stromsensor mit den im Patentanspruch 1 angegebenen Merkmalen.

Der erfindungsgemäße Stromsensor ist demnach dadurch gekennzeichnet, daß die Sensorfaser an ihrem einen, freien Ende verspiegelt ist und daß das von der Lichtquelle erzeugte Licht eine Kohärenzlänge aufweist, welche kleiner als der optische Wegunterschied zwischen den beiden optischen Achsen in der polarisationserhaltenden Faser ist.

Wie nachfolgend noch eingehender erläutert wird, breiten sich bei dem erfindungsgemäßen Stromsensor die beiden in der polarisationserhaltenden Faser angeregten und nachfolgend im Lambda/4-Retarder zirkular polarisierten Moden in der Sensorfaser in der gleichen

Richtung aus, anstatt in entgegengesetzten Richtungen, wie dies bei dem bekannten Stromsensor der Fall ist. Am freien, verspiegelten Ende der Sensorfaser werden die beiden zirkular polarisierten Moden reflektiert. Dabei wird die rechtszirkular polarisierte Mode als linkszirkulare und die linkszirkulare als rechtszirkulare Mode zurückreflektiert. Auf diese Weise ist die für das Meßprinzip notwendige Reziprozität im Lichtweg sichergestellt, so daß der nichtreziproke Faraday-Effekt detektiert werden kann.

Gegenüber dem bekannten Stromsensor benötigt die erfindungsgemäße Reflexkonfiguration lediglich eine polarisationserhaltende Faser. Insbesondere dann, wenn mittels der polarisationserhaltenden Faser größere Abstände zu überbrücken sind, können die Kosten der gesamten Anordnung durch die Einsparung der Faser erheblich reduziert werden. Des Weiteren entfällt gegenüber dem bekannten Stromsensor ein Lambda/4-Retarder sowie der dort zur Strahlauflaufteilung benötigte polarisationserhaltende Faserkoppler. Bei gleicher Empfindlichkeit wird nur die halbe Länge für die Sensorfaser benötigt, da der nichtreziproke Faraday-Effekt in der Sensorfaser sowohl auf dem Hinweg als auch auf dem Rückweg aufsummiert wird. Bei gleicher Faserlänge wäre der detektierte Faraday-Effekt im Vergleich mit der bekannten Konfiguration doppelt so groß. Mit einer Reduktion der Sensorfaserlänge ist in vorteilhafter Weise auch eine Reduktion der Störempfindlichkeit verbunden. Schließlich werden auch weniger Spleißverbindungen benötigt.

Kurze Erläuterung der Figuren

Die Erfindung soll nachfolgend anhand von Ausführungsbeispielen im Zusammenhang mit den Figuren näher erläutert werden. Es zeigen

Fig. 1 den generellen Aufbau eines faseroptischen Stromsensors nach der vorliegenden Erfindung, wobei nur die Grundelemente dargestellt sind,

Fig. 2 unter a) und b) in zwei Diagrammen E-Vektoren von sich in den Fasern des Stromsensors von Fig. 1 ausbreitenden Lichtwellen bzw. Moden, wobei unter a) die E-Vektoren der hinlaufenden und unter b) die der reflektierten Lichtwellen dargestellt sind, und

Fig. 3 einen erfindungsgemäßen Stromsensor in etwas detaillierterer Ausgestaltung.

Wege zur Ausführung der Erfindung

In Fig. 1 bezeichnet 1 eine Lichtquelle, 2 einen vorzugsweise polarisationserhaltenden Faserkoppler, 3 eine erste 45° -Spleißverbindung, 4 eine distanzüberbrückende, zwei optische Achsen aufweisende, polarisationserhaltende Faser, 5 eine weitere 45° -Spleißverbindung, 6 einen Lambda/4-Retarder, 7 eine in mehreren Windungen um einen elektrischen Leiter 8 gewundene Sensorfaser und 9 einen Spiegel bzw. eine Verspiegelung am freien Ende der Sensorfaser 7. Mit 10 ist eine Interferenz-Auswerteeinheit bezeichnet.

Die Lichtquelle 1 ist vorzugsweise ein Laser, welcher linear polarisiertes Licht mit kurzer Kohärenzlänge erzeugt.

Das linear polarisierte Licht von der Lichtquelle 1 wird über den Faserkoppler 2 und die erste 45° -Spleißverbindung 3 derart in die polarisationserhaltende Faser 4 eingekoppelt, daß in dieser zwei zueinander orthogonale Moden entsprechend den beiden optischen Achsen dieser Faser mit möglichst gleicher Amplitude angeregt werden. Im Diagramm von Fig. 2a) ist der E-Vektor des von der Lichtquelle stammenden linear polarisierten

Lichtes in Richtung der y-Achse aufgetragen und mit E_0 bezeichnet, während die E-Vektoren der beiden zueinander orthogonalen und mit der ursprünglichen Polarisationsrichtung einen Winkel von 45° einschließenden Moden in der polarisationserhaltenden Faser 4 mit E_1 und E_2 bezeichnet sind.

Da die Ausbreitungsgeschwindigkeit dieser Moden in der polarisationserhaltenden Faser unterschiedlich ist, akkumulieren sie beim (ersten) Durchlaufen dieser Faser einen gewissen Gangunterschied ΔL . Die Lichtquelle 1 ist nun so ausgewählt, daß die Kohärenzlänge des von ihr erzeugten Lichtes kleiner als dieser Gangunterschied ΔL und vorzugsweise sogar kleiner als $2 \cdot \Delta L$ ist. Die beiden Moden sind dann nach dem Durchlaufen der polarisationserhaltenden Faser voneinander unabhängig.

Die E-Vektoren E_1 und E_2 der beiden gegeneinander laufzeitmäßig verschobenen Moden lassen sich, wie dies in Fig. 2a) auch dargestellt ist, ihrerseits jeweils in zwei zueinander orthogonale Komponenten zerlegen, welche in Fig. 2a) mit E_{11} und E_{12} bzw. mit E_{21} und E_{22} bezeichnet sind.

Durch den Lambda/4-Retarder 6 wird dann aus den Komponenten E_{11} und E_{12} rechtszirkular polarisiertes und aus den Komponenten E_{21} und E_{22} linkszirkular polarisiertes Licht erzeugt, indem durch den Lambda/4-Retarder 6 beispielsweise die beiden entlang der Y-Achse ausgerichteten Komponenten E_{11} bzw. E_{21} um eine viertel Wellenlänge (Lambda/4) gegenüber ihren jeweils zugehörigen, in Richtung der positiven bzw. negativen X-Achse ausgerichteten Komponenten E_{12} und E_{22} verzögert werden.

Das derart erzeugte, rechts- bzw. linkszirkular polarisierte Licht durchläuft die Sensorfaser 7, wird an deren Ende reflektiert und läuft anschließend zum Lambda/4-Retarder 6 wieder zurück. Bei der Reflexion wird durch den dabei auftretenden Phasensprung von einer halben Wellenlänge (/2) das rechtszirkular polarisierte Licht in linkszirkular polarisiertes und das linkszirkular polarisierte Licht in rechtszirkular polarisiertes verwandelt. Die zuvor durch den Lambda/4-Retarder 6 um Lambda/4 gegenüber den X-Komponenten E_{12} und E_{22} verzögerten Y-Komponenten E_{11} und E_{21} laufen diesen jetzt um Lambda/4 vor. Durch erneute Verzögerung der Y-Komponenten beim erneuten Passieren des Lambda/4-Retarders werden die X- und Y Komponenten jeweils wieder phasengleich. Sie lassen sich dadurch auch wieder zu zwei zueinander orthogonalen, linear polarisierten Moden zusammensetzen. Die beiden zurücklaufenden Moden sind dabei allerdings gegenüber den hinlaufenden Moden E_1 und E_2 bezüglich ihrer Richtungen gerade vertauscht. Die entsprechenden, vertauschten Verhältnisse sind in Fig. 2b) dargestellt. In Fig. 2b) sowie im folgenden sind die zurücklaufenden Wellen bzw. Moden zur Unterscheidung von den hinlaufenden mit einem Beistrich versehen.

Das Vertauschen der Richtungen der beiden reflektierten Moden E_1' und E_2' hat zur Folge, daß die zuvor auf der "schnellen" Achse übertragene Mode beim Zurücklaufen auf der "langsamen" Achse dieser Faser übertragen wird und umgekehrt. Der beim Hinlaufen akkumulierte Gangunterschied zwischen den beiden Moden wird dadurch beim Zurücklaufen gerade wieder aufgehoben bzw. rückgängig gemacht. Nach dem erneuten Durchlaufen der polarisationserhaltenden Faser 4 sind die beiden Moden wieder in Phase und können miteinander interferieren. Für Licht, welches wegen nicht-idealer Elemente eine Kopplung von einem Pola-

rationszustand in den (orthogonalen) anderen erfahren hat, liegen hingegen nicht diese Verhältnisse vor. Solches Licht kann am Ausgang des Interferometers keine unerwünschten Interferenzen produzieren; sein Weglängenunterschied ($2 \cdot \Delta L$) ist größer als die Kohärenzlänge der Lichtquelle.

Auf die vorbeschriebene Weise ist, wie bereits erwähnt, die Reziprozität im Lichtweg sichergestellt. Allein dadurch kann der nichtreziproke, außerordentlich kleine Faraday-Effekt überhaupt gemessen werden. Der Faraday-Effekt besteht darin, daß das von einem in dem elektrischen Stromleiter 8 fließenden Strom I verursachte Magnetfeld den Brechungsindex für rechtszirkular polarisiertes Licht in der Sensorfaser 7 genau umgekehrt verändert wie den für linkszirkular polarisiertes Licht und zwar jeweils proportional zur Stromstärke. Ein im Stromleiter 8 fließender Strom I wird dadurch eine gewisse Phasenverschiebung bewirken, welche dann eine meßbare Veränderung des durch die Interferenz zwischen den beiden reflektierten Moden E_1' und E_2' erzeugten Interferenzmusters zur Folge hat. Zur Auswertung des Interferenzmusters bzw. seiner Veränderung dient die Interferenz-Auswerteeinheit 10.

Im folgenden wird nun auf Fig. 3 bezug genommen. Die Elemente des darin dargestellten faseroptischen Stromsensors sind, soweit sie mit solchen des in Fig. 1 dargestellten Stromsensors übereinstimmen, mit den gleichen Bezugszeichen versehen wie jene. Zusätzlich ist ein Phasenmodulator 11, ein Polarisator 12 sowie ein Detektor 13 dargestellt. Die Interferenz zwischen den beiden reflektierten Moden findet im Polarisator 12 statt. Die Anforderungen an den Faserkoppler 2 sind deshalb gering (nur Intensitätsübertragung). Der Detektor 13 wertet die durch den Faraday-Effekt bei sich änderndem Strom I verursachten Intensitätsänderungen des erzeugten Interferenzmusters aus. Der Phasenmodulator, welcher die Zeitverzögerungen moduliert, dient zur Optimierung des Arbeitspunktes (nicht-reziproker Verschiebung des Arbeitspunktes von einem Maximum der Detektor-Ausgangstromkurve in deren steile Flanke/n). Um den optimalen Faraday-Effekt zu erhalten, muß die Modulationsfrequenz gleich $1/T$ sein, wobei T die Zeit ist, die das Licht der Lichtquelle 1 für einen vollständigen Durchlauf durch das Interferometer benötigt.

Der Lambda/4-Retarder 6, der Polarisator 12 sowie der Phasenmodulator 11 sind vorzugsweise sog. "all-fiber"-Elemente und die polarisationserhaltende Faser 4 eine sog. "hi-bi"-Faser. Der Lambda/4-Retarder 6 wird dabei gebildet durch eine zwischen zwei steifen Platten eingeklemmte Faserschlaufe und der Phasenmodulator 11 durch etwa 10 um einen piezo-keramischen Zylinder (Durchmesser ca. 32 mm) gewickelte Windungen einer polarisationserhaltenden Faser. Weitere Einzelheiten zu diesen sowie auch den übrigen Elementen können den eingangs erwähnten Literaturstellen (S. Ezekiel et al. bzw. G. Frosio et al.) entnommen werden.

Patentansprüche

1. Faseroptischer Stromsensor zur Messung des in einem elektrischen Stromleiter (8) fließenden Stromes (I), umfassend

- eine linear polarisierte Licht erzeugende Lichtquelle (1);
- eine zwei optische Achsen aufweisende polarisationserhaltende Faser (4);
- einen Faserkoppler (2);

d) einen Lambda/4-Retarder (6);
e) eine in mehreren Windungen um den Stromleiter geführte Sensorfaser (7); und
eine Interferenz-Auswerteeinheit (10, 12, 13);
wobei das Licht von der Lichtquelle (1) über den Faserkoppler (2) derart in die polarisationserhaltende Faser (4) eingekoppelt ist, daß in dieser beide Polarisationsrichtungen gleichstark angeregt sind, und
wobei der Lambda/4-Retarder (6) im Lichtweg zwischen der polarisationserhaltenden Faser (4) und der Sensorfaser (7) angeordnet ist;
dadurch gekennzeichnet, daß
f) die Sensorfaser (7) an ihrem einen, freien Ende verspiegelt ist, und
g) das von der Lichtquelle (1) erzeugte Licht eine Kohärenzlänge aufweist, welche kleiner als der optische Wegunterschied zwischen den beiden optischen Achsen in der polarisationserhaltenden Faser (4) ist.
2. Stromsensor nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das von der Lichtquelle (1) erzeugte Licht eine Kohärenzlänge aufweist, welche kleiner als der doppelte optische Wegunterschied zwischen den beiden optischen Achsen in der polarisationserhaltenden Faser (4) ist.
3. Stromsensor nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß im Lichtweg zwischen dem Faserkoppler (2) und der Sensorfaser (7) ein nicht-reziproker Phasenmodulator (11) zur Optimierung des Arbeitspunktes angeordnet ist.
4. Stromsensor nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß der Faserkoppler (2) polarisationserhaltend ist.
5. Stromsensor nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß im Lichtweg zwischen dem Faserkoppler (2) und der polarisationserhaltenden Faser (4) ein Polarisator (12) angeordnet ist und daß die Interferenz-Auswerteeinheit einen auf Lichtintensität empfindlichen Detektor (13) umfaßt.

Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen

45

50

55

60

65

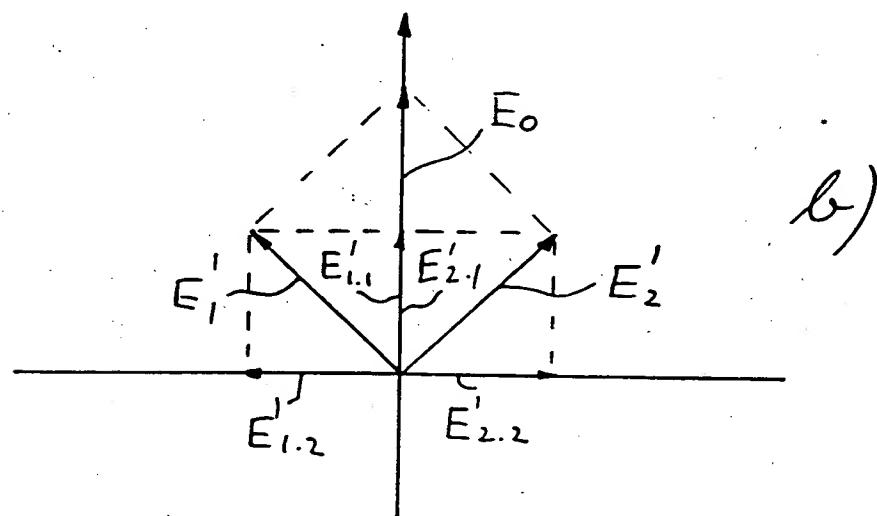
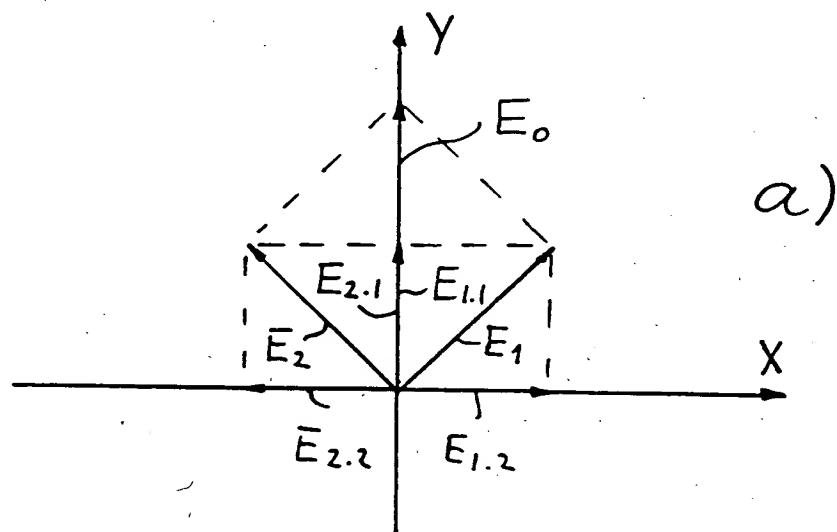


Fig. 2

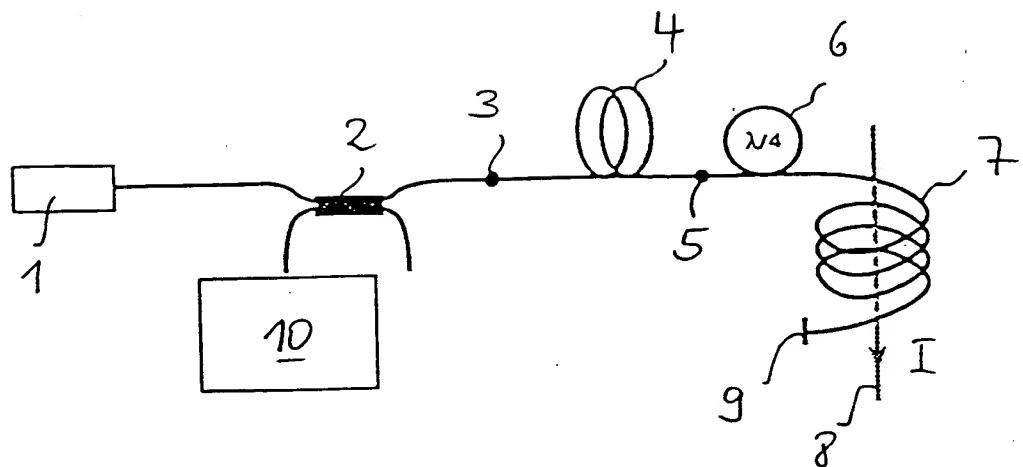


Fig. 1

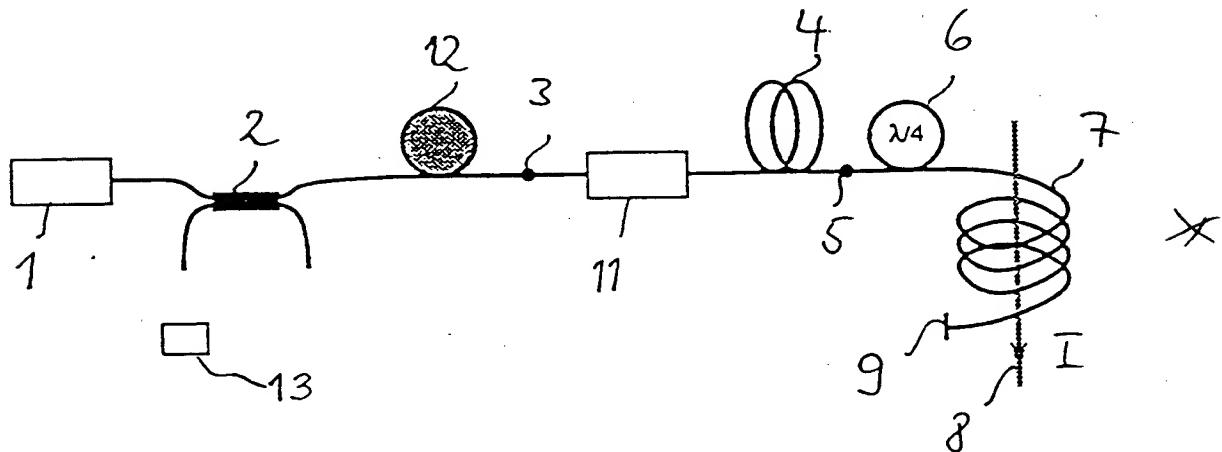


Fig. 3